第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.11
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201603170479
张卫国,肖德荣,田昆,陈广磊,和荣华,张贇.玉龙雪山 3 个针叶树种在海拔上限的径向生长及气候响应.生态学报,2017,37(11):3796-3804.
Zhang W G, Xiao D R, Tian K, Chen G L, He R H, Zhang Y.Response of radial growth of three conifer species to climate at their respective upper distributional limits on Yulong snow Mountain.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3796-3804.

玉龙雪山 3 个针叶树种在海拔上限的径向生长及气候响应

张卫国[1],肖德荣[1],田　昆[1],陈广磊[1,2],和荣华[3],张　贇[1,*]
1 西南林业大学国家高原湿地研究中心,昆明　650224
2 西南林业大学环境科学与工程学院,昆明　650224
3 丽江玉龙雪山省级自然保护区管理局,丽江　674100

摘要:树木生长对气候变化的响应是国内外研究的热点。选择滇西北高原玉龙雪山海拔分布上限 3 个主要树种(长苞冷杉(*Abies georgei*)、丽江云杉(*Picea likiangensis*)和大果红杉(*Larix potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law)),对其径向生长特征进行研究,构建差值年表,并分析其与温度和降水的相互关系。研究结果表明:(1)温度和降水均为玉龙雪山海拔上限树木生长的主要影响因子,但不同树种响应的时期和关系存在差异;(2)大果红杉生长主要受限于生长初期(5—6 月)的水热条件,主要表现为与当年 5 月、6 月以及生长初期(5—6 月)的平均温呈显著正相关,以及与当年 5 月、6 月以及生长初期的降水呈显著负相关;(3)长苞冷杉生长主要受限于生长初期(5—6 月)的水分条件,表现为显著负相关,同时生长盛期(7—8 月)温度的升高有利于其径向生长;(4)丽江云杉的生长则主要受限于生长季开始以前的气候条件,与上年 12 月以及当年 5 月的平均温呈显著负相关,与当年 1 月的降水呈显著正相关。本研究的结果可为气候变化对滇西北高原树木生长影响的研究提供参考,并为该地区历史气候重建提供科学基础。

关键词:树木年轮;气候响应;海拔分布上限;滇西北高原

Response of radial growth of three conifer species to climate at their respective upper distributional limits on Yulong snow Mountain

ZHANG Weiguo[1], XIAO Derong[1], TIAN Kun[1], CHEN Guanglei[1,2], HE Ronghua[3], ZHANG Yun[1,*]
1 *National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*
2 *College of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*
3 *Administration of Yulong Snow Mountain Provincial Reserve, Lijiang* 674100, *China*

Abstract: The Northwestern Yunnan Plateau is located on the southeastern margin of the Tibetan Plateau, which is an area sensitive to climate change. In this area, forests have remained undisturbed due to their remote location, and many tree species have grown to their upper distributional limits. Accordingly, it is an ideal location for dendroclimatological study. Although some dendrochronological research has been carried out on the Northwestern Yunnan Plateau, few studies have been conducted on Yulong snow Mountain, which is a typical snow mountain and supports growth of the main tree species in the area. In order to detect the response of tree growth to climate change on the Northwestern Yunnan Plateau, we used the tree-ring width index of three major conifers, *Abies georgei*, *Picea likiangensis*, and *Larix potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law, at their upper distributional limits on Yulong Snow Mountain. Specifically, we focused on the characteristics of

基金项目:西南林业大学科研启动基金项目(111428);云南省教育厅重点基金项目(2015Z136);云南省高原湿地科学创新团队(2012HC007)
收稿日期:2016-03-17;　　**网络出版日期:**2017-02-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangyuncool@ 163.com

residual chronologies and the relationships between radial growth and climatic factors (temperature and precipitation). We aimed to identify the main climatic factors limiting tree growth in the area and detect differences in growth responses to climate among the studied species. The following results were obtained (1) Temperature and precipitation were the main factors affecting tree growth at the upper distributional limits on Yulong snow Mountain, but the effects varied according to tree species. (2) The radial growth of *L. potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law was mainly limited by temperature and precipitation during the early growing season (May—June) of the current year, and was positively and negatively correlated with temperature and precipitation in May and June, respectively. (3) Precipitation during the early growing season of the current year was the main factor limiting the radial growth of *A. georgei*, with a significantly negative correlation between the residual chronology and May—June precipitation, whereas higher temperature during the growing season (July—August) of the current year positively affected its growth. (4) The radial growth of *P. likiangensis* was mainly limited by climatic factors before the start of the growing season, showing a significantly negative correlation between growth and mean temperature of the previous December and current May, and a significantly positive correlation between growth and precipitation during the current January. Our research represents a reference tree-ring study of the Northwestern Yunnan Plateau, and can provide a scientific basis for climate reconstruction in the area.

Key Words: dendrochronology; climatic response; upper distributional limit; Northwestern Yunnan Plateau

树木生长不仅受自身生理因素的影响,也受外界环境条件的制约。气候因子是影响树木生长和森林生态系统的重要环境因子。在去除树木自身生长趋势和其他非气候因素的影响后,年轮指数将保留大量过去气候变化的信息,因此树木年轮成为研究树木生长与气候关系的重要手段[1]。

以往研究表明不同生境条件下影响树木生长的气候因子不同,高海拔或高纬度地区,温度是主要影响因子,低海拔或干旱地区,树木生长主要受降水影响[2-4]。海拔上限的树木处在生理活动极限区,其生长对气候变化更为敏感,因而海拔上限的树木年轮学研究受到广泛关注。一般认为海拔上限树木径向生长主要受温度的影响,但也有学者发现海拔上限树木生长同样受降水的影响[5-6]。上述研究结果证明了海拔上限树木径向生长对气候变化响应的敏感性、复杂性和不确定性,因而海拔上限树木生长对气候的响应研究,能够帮助人们深入理解树木生长对不同气候因子的响应机制,对预测未来气候变化背景下的树木生长提供指导。

滇西北高原位于青藏高原东南缘,为全球气候变化的敏感区[7]。许多树种在该地区形成了海拔分布上限,加之人为活动干扰少,使该地区成为了树木年轮学研究的理想场所。目前,已开展了对滇西北高原树木年轮的研究,例如 Fan 等利用树木年轮资料重建了该区域过去 250a 的年平均温度,重建并分析了该区域数百年的干旱情况[8-9],Li 等利用树木年轮资料重建了该区域夏季气温[10],Bi 和 Guo 等分别重建并分析了该区域帕尔默干旱指数[11-12],但研究主要集中在该区域横断山区中段的中北部,中段南部的树轮研究较少。而树木生长对气候变化响应存在区域或微地形差异,同一山脉的南、北段或者不同坡位,树木生长会受不同气候因子的限制[13]。玉龙雪山作为横断山区中段南部的典型雪山,年轮研究相对缺乏,以往开展的年轮研究只针对了单个树种[14],对不同树种年轮宽度与气候因子关系的研究较少。同一地区不同树种对气候的响应存在显著差异,因而不同树种对气候响应差异的研究有利于全面了解影响该地区树木生长的主要气候因子。

本研究拟以滇西北高原玉龙雪山海拔分布上限典型针叶树种长苞冷杉(*Abies georgei*)、丽江云杉(*Picea likiangensis*)和大果红杉(*Larix potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law)为研究对象,以树轮宽度为研究手段,主要研究:(1)3 个树种径向生长特征及其物种间的差异特征;(2)3 个树种径向生长与温度的关系及其物种间响应的差异;(3)3 个树种径向生长与降水的关系及其物种间响应的差异。研究拟进一步补充和完善滇西北高原树轮资料,为探讨不同树种对气候变化的响应差异以及影响该地区树木生长的主要气候因子提供理论依据,为应对气候变化、加强滇西北高原森林保护和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玉龙雪山位于云南省丽江市西北部，是我国纬度最南的一座雪山，同时也是欧亚大陆雪山中距赤道最近的海洋性冰川区，地处 27°10′—27°40′N，100°10′—100°20′E 之间。西北临金沙江虎跳峡，东麓是干海子高位山间盆地，南面为丽江盆地。主峰海拔 5596 m，海拔梯度变化大，土壤类型丰富，随着海拔的升高，呈带状有规律的分布。从低到高，土壤类型依次为红壤（2700—3200 m）、山地生草灰化土（3100—3300 m）、腐殖质碳酸盐土（3300—3800 m）和高山草甸土（3800—4200 m）[15]。由于水文、地形、土壤等条件不同，在玉龙雪山形成了丰富的植物资源，海拔 2000—2800 m 之间，为半湿润常绿阔叶林、云南松（*Pinus yunnanensis*）林；海拔 2800—3100 m 之间，为针阔混交林带，主要树种为云南松、丽江云杉、大果红杉、高山栎（*Quercus pannosa*）等；海拔 3100—4200 m 之间，为亚高山寒温性针叶林带，主要树种为高山松（*Pinus densata*）、丽江云杉、长苞冷杉、大果红杉等；海拔 3700—4300 m 之间，为高山杜鹃（*Rhododendron lapponicum*）灌丛草甸带，是树线至雪线之间的过渡地带[15-16]。

玉龙雪山地处我国西南部季风气候区，受高空西风环流和西南季风交替控制，分干湿两季，气候具有雨热同期的特点。根据丽江气象站 1951—2010 年的数据资料（图 1），其年平均温为 12.7 ℃，1 月最冷，平均温为 6.1 ℃，6 月最热，平均温为 18.2 ℃；降水较为丰富，年平均降水量 965 mm，但时间分配不均，主要集中在 6—9 月，占全年降水量的 81%。近 60 年来，丽江年均温上升趋势明显，年降水量有增多的趋势，但不显著（图 1）。

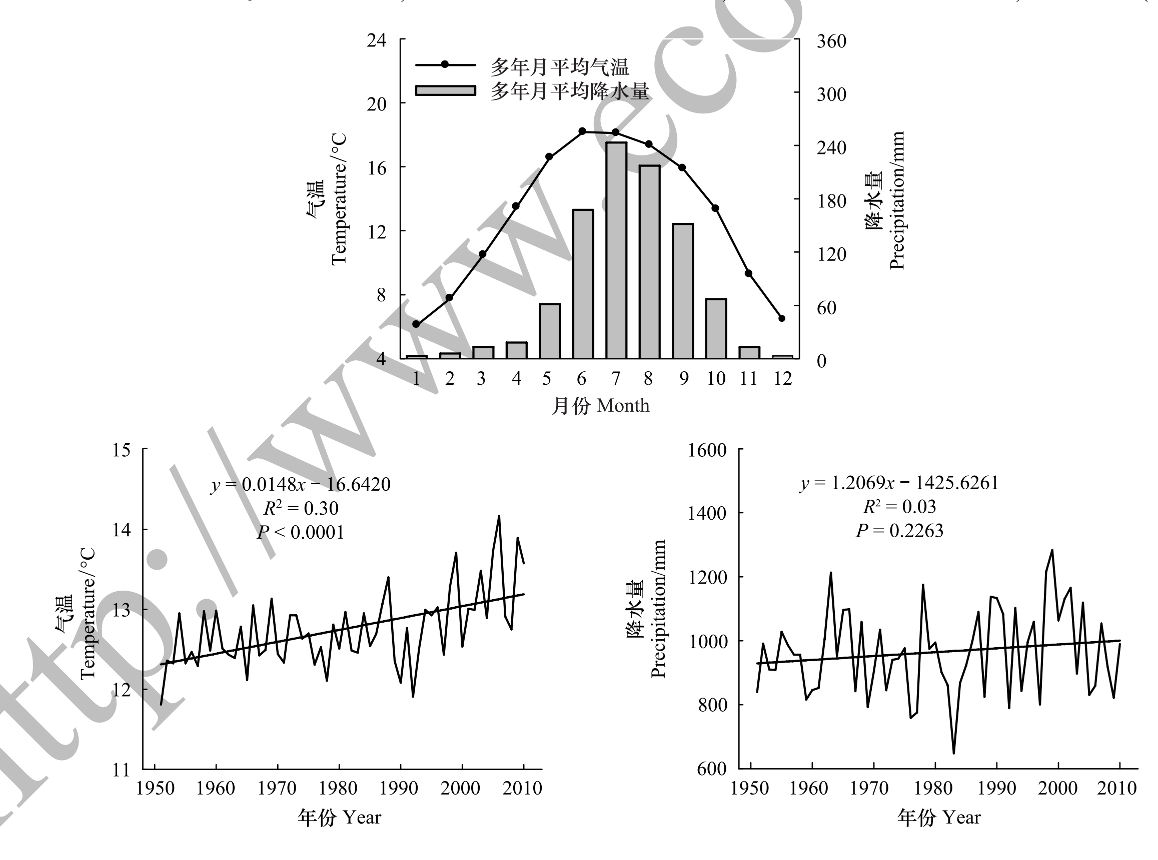


图 1 丽江气象站 1951—2010 年气象资料

Fig.1 Climate data from the Lijiang meteorological station (1951—2010)

1.2 树种的选择及样本采集与年表建立

2015 年 8 月，在玉龙雪山森林分布上限采集长苞冷杉、丽江云杉和大果红杉树轮样本。按照国际树木年轮数据库（International Tree-ring Date Bank，ITRDB）的样品采集标准[17]，采样时，尽量选择树龄较大、生长良

好的树木。同时,为保证样本所含气候信息的一致性,同一树种的采样点高差被控制在 10 m 以内。每棵树用内径为 5.15 mm 的生长锥在树高 1.3 m 处,从不同方向采集 2 个样芯,3 个树种共采集 40 棵树,80 个样芯(表 1)。

表 1　树木年轮采样点概况

Table 1　Description of the sampling sites

树种 Tree species	纬度/N Latitude	经度/E Longitude	样本量* Sample No.	海拔/m Elevation
长苞冷杉 *Abies georgei*	27°06′04.50″	100°12′49.80″	12/24	4014
丽江云杉 *Picea likiangensis*	27°08′43.21″	100°12′51.95″	16/32	3610
大果红杉 *Larix potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law	27°06′13.92″	100°12′45.96″	12/24	3647

* 分子数据代表株数,分母数据代表蕊数

样品带回实验室,按照 Stokes 和 Smiley 阐述的基本方法对样品进行预处理[18]。待样品自然风干后,用白乳胶固定在样槽中,用砂纸细致打磨直至表面光滑、年轮清晰可见。将打磨好的样品放在显微镜下初步定年,然后放于 EPSON Scan(Expression 11000XL)扫描仪上进行扫描,扫描参数设置为图像类型 24-位全彩,分辨率 3200 dpi,扫描的年轮图片用软件 CDendro and CooRecorder ver. 7.3[19] 测量年轮宽度,该系统精度为 0.001 mm。最后利用 COFECHA 程序[20]交叉定年和对测量结果进行检验,剔除了年轮序列与主序列相关性低的样芯,最终剩余 37 棵树,71 个样芯进入主序列(表 2)。运用 ARSTAN 程序[21]采用负指数函数进行拟合,去除树木自身遗传因子所产生的生长趋势,最终建立了玉龙雪山长苞冷杉、丽江云杉、大果红杉树轮宽度的标准化年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。从年表统计特征值可知,差值年表的各项统计特征均高于标准化年表,加之差值年表具有高质量的高频信息[22],因此,本研究利用差值年表(图 2)与气候因子进行相关性分析。

1.3　气象数据收集与处理

气象数据选取距采样点最近的丽江气象站(26.87°N,100.22°E,海拔 2393.2 m)器测气象数据资料。丽江气象资料来自于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn),资料时段为 1951—2010 年,包括月平均温和月降水量两个气象要素。为了检验气候数据的均一性,采用 Mann-Kendall 法[23]对其进行突变检验,结果显示气象数据通过置信度为 0.05 的显著性水平,检验结果表明,气象数据稳定可靠,可以满足本研究进行气候因子分析的需要。

1.4　数据分析

本研究利用树木年轮学的专业软件 DendroClim2002[24],运用响应函数分析年轮指数与气候因子的相关关系,考虑到上年气候因子对当年树木生长的影响,选取了上年 7 月至当年 10 月的月平均温和月降水量以及上年生长后期(上年 9—10 月)、当年生长初期(5—6 月)、生长盛期(7—8 月)、生长后期(9—10 月)的平均温和总降水量,与 3 个树种各自公共区间的年轮指数进行相关分析。

2　结果

2.1　年表特征分析

由 3 个树种的年表特征和公共区间统计特征分析可知,大果红杉年表的平均敏感度(MS)、第一特征向量百分比(PC1)、信噪比(SNR)和样本对总体的代表性(EPS)均高于长苞冷杉和丽江云杉年表,说明大果红杉年轮指数包含更多的环境信息,更适合树木年轮学的研究。3 个树种年表的样本总体代表性均超过了 85%,说明 3 个年表都能较好地代表研究区内长苞冷杉、丽江云杉和大果红杉树轮宽度变化的基本特征,适合于树木年轮的研究。

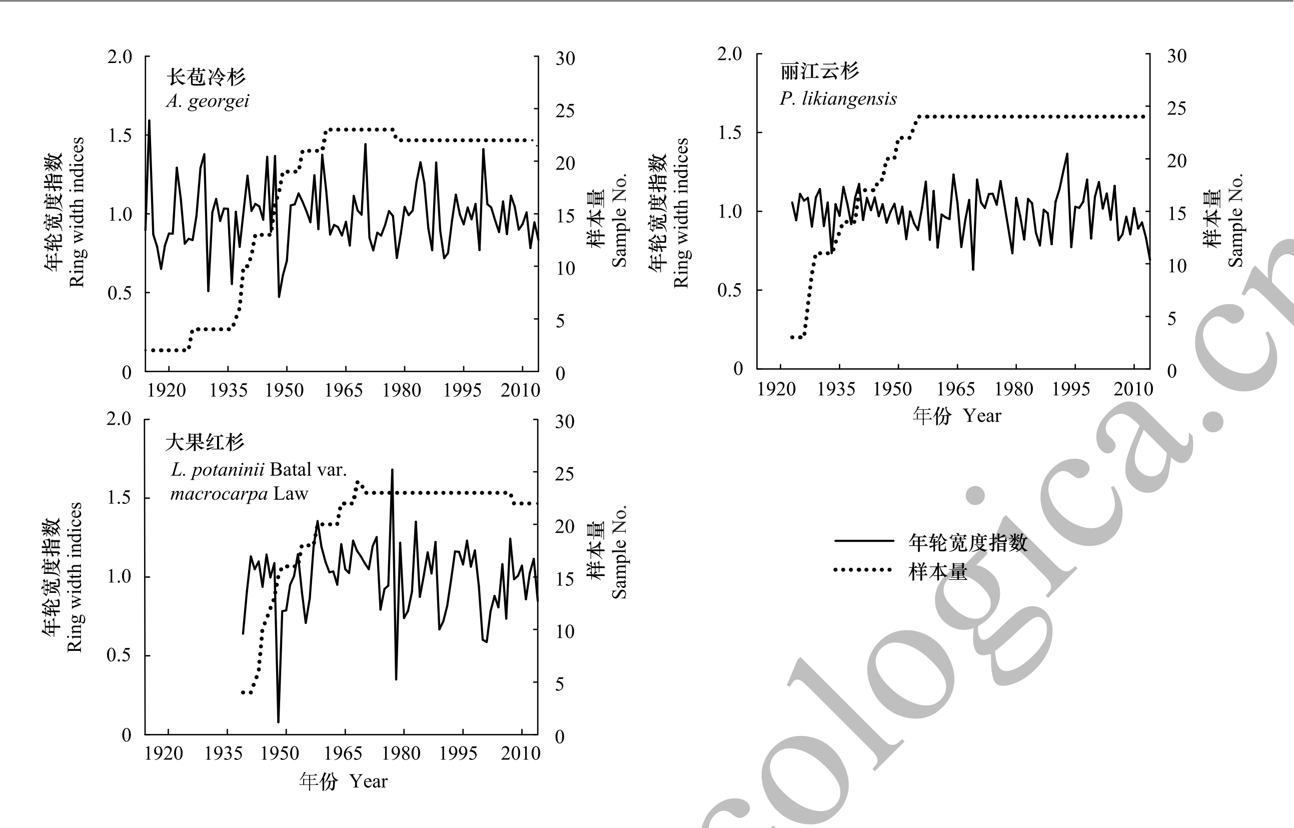


图 2 树轮宽度差值年表(实线)和样本量(虚线)

Fig.2 Residual tree-ring chronology (solid line) **and sample size** (dotted line)

表 2 树轮年表及公共区间统计量

Table 2 Statistics of residual chronologies and common interval analysis

年表 Residual chronologies	长苞冷杉 *A. georgei*	丽江云杉 *P. likiangensis*	大果红杉 *L. potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law
样本量 Sample No.	12/23	13/24	12/24
起止时间 chronology span/a	1914—2014	1923—2014	1939—2014
平均敏感度 Mean sensitivity	0.257	0.147	0.288
公共区间 Common interval/a	1955—2014	1956—2014	1959—2014
公共区间统计量 Statistics of common interval analysis			
第一特征向量百分比 Variance in first eigenvector/%	32.95	38.99	52.98
标准差 Standard deviation	0.194	0.137	0.233
信噪比 Signal-to-noise ratio	7.122	12.616	21.787
样本总体代表性 Expressed population signal	0.877	0.927	0.956

2.2 径向生长对气候的响应

长苞冷杉差值年表与平均温和降水的相关分析表明(图 3),长苞冷杉径向生长与各月平均温响应不显著,与当年 6 月的降水呈显著负相关($P<0.05$)。而与生长季温度和降水的相关分析表明(表 3),长苞冷杉径向生长与当年生长盛期(7—8 月)的平均温呈显著正相关,与生长初期(5—6 月)的降水呈显著负相关。

丽江云杉径向生长与上年 12 月以及当年 5 月的平均温呈显著负相关,与 1 月的降水呈显著正相关(图 3)。而与生长季的气候因子相关分析表明(表 3),丽江云杉径向生长与生长季的平均温和降水均未达到显著相关。

大果红杉径向生长与当年 2 月、5 月和 6 月的平均温达到显著相关,其中与 2 月的平均温呈显著负相关,与 5 月和 6 月的平均温呈显著正相关,与当年 5 月和 6 月的降水则呈显著负相关(图 3)。由大果红杉与生长

季气候因子响应分析可知(表 3),大果红杉与当年生长初期的平均温呈显著正相关,与降水呈显著负相关。

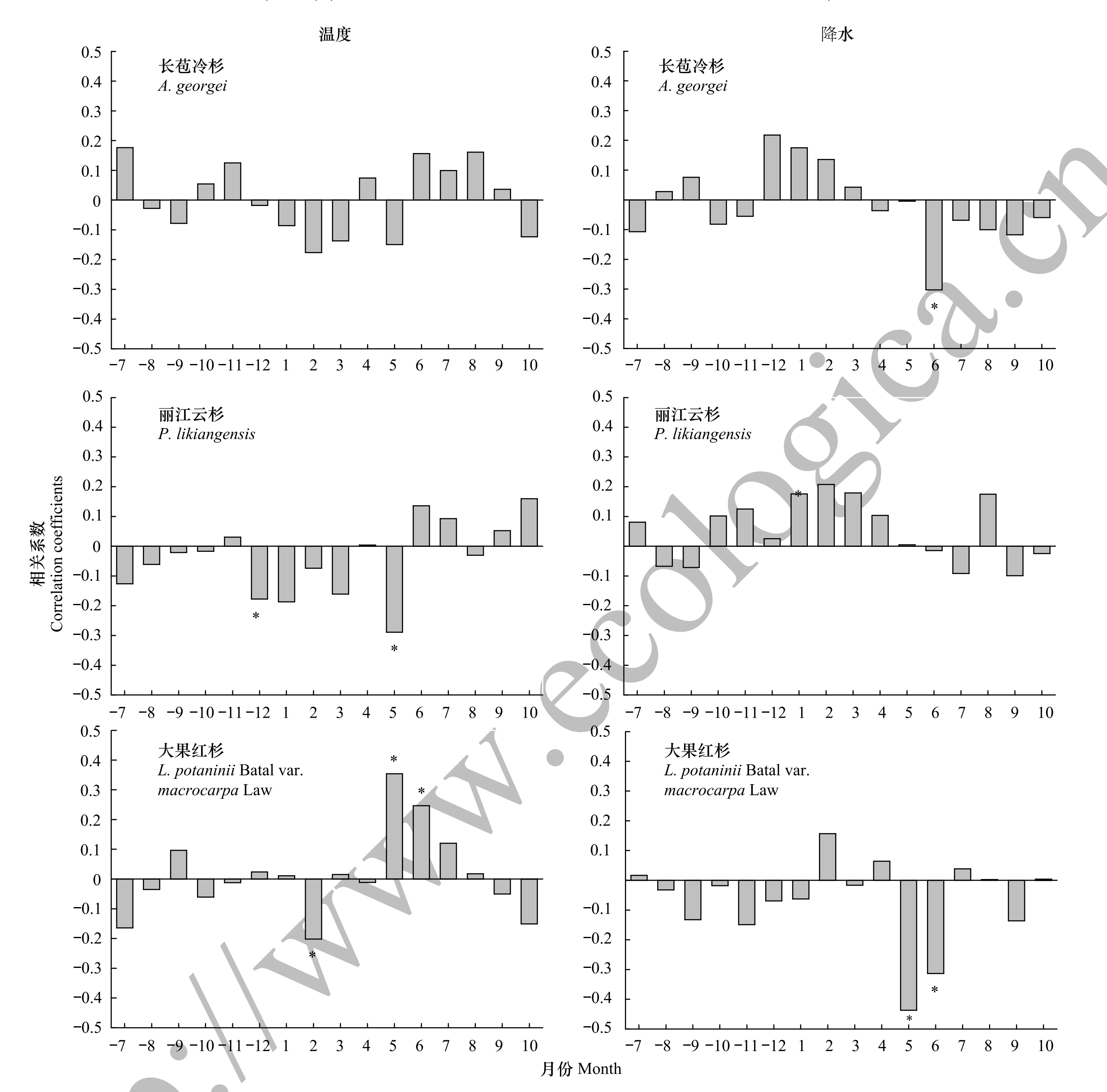


图 3　树轮宽度差值年表与逐月气候因子的相关分析结果

Fig.3　Correlation analyses of response function between the residual chronologies and the monthly climatic factors

图中月份-表示上一年，* 表示达到 0.05 水平的显著相关

3　讨论

温度和降水均为影响玉龙雪山海拔分布上限树木径向生长的主要气候因子,研究结果虽然与海拔上限树木生长主要受温度制约的传统认识不同[5],但在中国其他的高山地区也得出与本研究相似的结果[6]。这可能与长苞冷杉、丽江云杉和大果红杉的生理特性有关,也说明树木生长对气候变化响应存在区域差异。

大果红杉的径向生长主要受生长初期(5—6 月)水热条件的影响,反映出早期生理过程的重要性及其受光热影响较大的特性。其径向生长与生长初期(5—6 月)以及 5 月和 6 月的平均温呈显著正相关,说明生长

初期的高温有利于其宽轮的形成。这是因为在生长初期,大果红杉新叶开始发育,木质部形成层细胞开始分裂和伸长,故此时的高温条件对其径向生长尤为重要[25]。在相邻的川西、藏东高海拔地区,生长初期温度对大果红杉、西藏红杉(*Larix griffithiana*)和红杉(*Larix potaninii*)的促进作用均有报道[26]。另外,高温有利于其进行光合作用,制造有机物,促进径向生长[27]。若此阶段降雨过多(与5—6月的降水呈显著负相关),则云量增多引起光热条件不足(太阳辐射减少和温度相对降低),从而导致光合作用速率下降,有机物生产减少,不利于宽轮的形成[14]。

表3 树轮宽度差值年表与生长季气候因子的相关分析结果

Table 3 Correlation analyses between the residual chronologies and the growing season climatic factors

生长季 Growing season	平均温 Mean temperature			降水量 Precipitation		
	长苞冷杉 *A. georgei*	丽江云杉 *P. likiangensis*	大果红杉 *L. potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law	长苞冷杉 *A. georgei*	丽江云杉 *P. likiangensis*	大果红杉 *L. potaninii* Batal var. *macrocarpa* Law
上一年生长后期(上年9—10月) Post growing season of previous year	-0.007	0.004	-0.004	0.009	0.003	-0.032
当年生长初期(当年5—6月) Early growing season of current year	-0.028	-0.066	0.523*	-0.335*	-0.012	-0.689*
当年生长盛期(当年7—8月) Growing season of current year	0.254*	0.018	0.105	-0.156	0.045	-0.062
当年生长后期(当年9—10月) Postgrowing season of current year	-0.154	0.037	-0.208	-0.145	-0.127	-0.118

注:* 表示达到0.05水平的显著相关

与大果红杉类似,生长初期降雨的增加,也不利于长苞冷杉的径向生长。但这里长苞冷杉表现出的和降雨负相关很可能是长苞冷杉和温度关系的间接反映。长苞冷杉海拔分布上限比大果红杉和丽江云杉高出400 m,温度条件更为恶劣,因而对任何形式造成的温度降低更为敏感。生长初期降雨增多表明太阳辐射和温度相对较低,不利于地面积雪的融化,导致根系活动能力恢复缓慢,不利于水分和营养物质的吸收,从而影响长苞冷杉的径向生长。长苞冷杉与生长盛期(7—8月)的平均温呈显著正相关,直接证明了温度因子在其海拔上限径向生长的重要性,生长盛期温度的升高提高了植物光合作用速率,有利于宽轮的形成[28]。另外,长苞冷杉径向生长与生长盛期整体达到显著相关,而与单月(7月和8月)未达到显著相关,说明了温度累积效应对长苞冷杉径向生长的重要性。

与大果红杉相反,5月的高温却给丽江云杉径向生长带来不利影响,可能是因为相比于大果红杉,丽江云杉对水分更为依赖。高海拔低温地区树木生长与温度的关系一般表现为显著正相关,高温有利于树木的生长,而与温度呈显著负相关并伴随与降水的正相关关系,则认为受到干旱胁迫的影响[27]。丽江云杉与5月的平均温呈显著负相关,与5月的降水呈正相关(不显著),5月的降水量并不充足(60 mm左右,图1),温度偏高加强了树木蒸腾和土壤蒸发,导致了干旱胁迫,从而不利于树木生长。在同一地区(小中甸),生长季初期(5月)干旱胁迫不利于丽江云杉径向生长也有报道[29]。海拔上限的长苞冷杉并未在生长初期表现出干旱胁迫,可能与其耐荫性更强,蒸腾蒸发需求低有关[30]。

另外,冬季的气候因子也是影响该区域树木生长的重要因素。丽江云杉径向生长与1月的降水(降雪形式)呈显著正相关,丽江云杉为浅根性树种,降雪增加有利于地面积雪的增厚,能够防止冬天低温(1月温度最低,图1a)对根系的伤害,从而有利于来年树木生长[31]。类似的研究结果在中国长白山林线[32]、日本中部亚高山林线[33]以及加拿大魁北克北部林线均有报道[34]。上年12月温度与丽江云杉、当年2月温度与大果红杉径向生长呈显著负相关,冬季的高温使得处于休眠状态的树木消耗增加,不利于营养物质的存积,从而影响来年树木的生长[35]。

本研究表明不同树种对温度和降水的响应结果存在差异,生长初期(大果红杉和长苞冷杉)和生长季前(丽江云杉)的气候要素是影响玉龙雪山树木生长的主要因子。大果红杉和长苞冷杉对光热变化更为敏感,

这可能与大果红杉喜光热特性以及长苞冷杉海拔分布更高有关,而丽江云杉对降水更为敏感,则可能与其耐旱性差有关。本研究的结果有助于阐明影响玉龙雪山树木生长的主要气候因子,也可为其他地区不同树种径向生长对气候响应差异的研究提供参考,同时为该地区历史气候重建提供理论依据。

参考文献(References):

[1] Zhang Q B, Hebda R J. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia, Canada. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(9): 1946-1954.

[2] Dittmar C, Zech W, Elling W. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe-a dendroecological study. Forest Ecology and Management, 2003, 173(1/3): 63-78.

[3] Leal S, Melvin T M, Grabner M, Wimmer R, Briffa K R. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate. Boreas, 2007, 36(4): 426-440.

[4] 徐宁, 王晓春, 张运东, 刘世荣. 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应. 生态学报, 2013, 33(12): 3742-3751.

[5] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 刘普幸, 张永, 方克艳. 阿尼玛卿山中部高山林线树轮宽度对气候变化的响应. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊2): 57-63.

[6] 张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2015, 35(19): 1-10.

[7] 牛贺文, 何元庆. 玉龙雪山地区大气降水中粉尘颗粒物特征研究. 冰川冻土, 2014, 36(1): 71-79.

[8] Fan Z X, Bräuning A, Gao K F. Annual temperature reconstruction in the central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings. Dendrochronologia, 2008, 26(2): 97-107.

[9] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F. Tree-ring based drought reconstruction in the central Hengduan Mountains region (China) since A.D. 1655. International Journal of Climatology, 2008, 28(14): 1879-1887.

[10] Li Z S, Zhang Q B, Ma K P. Tree-ring reconstruction of summer temperature for A.D. 1475-2003 in the central Hengduan Mountains, Northwestern Yunnan, China. Climatic Change, 2012, 110(1/2): 455-467.

[11] Bi Y F, Xu J C, Gebrekirstos A, Guo L, Zhao M X, Liang E Y, Yang X F. Assessing drought variability since 1650 AD from tree-rings on the Jade Dragon Snow Mountain, southwest China. International Journal of Climatology, 2015, 35(14): 4057-4065.

[12] Guo G A, Li Z S, Zhang Q B, Ma K P, Mu C L. Dendroclimatological studies of *Picea likiangensis* and *Tsuga dumosa* in Lijiang, China. IAWA Journal, 2009, 30(4): 435-441.

[13] Carrer M, Nola P, Eduard J L, Motta R, Urbinati C. Regional variability of climate-growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. Journal of Ecology, 2007, 95(5): 1072-1083.

[14] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F, Zhu S D. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 306-313.

[15] 冯建孟, 王襄平, 徐成东, 杨元合, 方精云. 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局. 山地学报, 2006, 24(1): 110-116.

[16] 肖霞云, 童松梅, 沈吉, 王苏民, 羊向东, 童国榜. 云南省玉龙雪山表土花粉垂直散布与植被关系研究. 第四纪研究, 2009, 29(1): 80-88.

[17] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. New York: Springer, 1990.

[18] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating. Chicago: University of Chicago Press, 1968.

[19] Larsson L A. CDendro v. 7.3. Cybis Elektronik & Data AB. Sweden: Saltsjöbaden, 2010.

[20] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.

[21] Cook E R, Holmes R L. Users Manual for Program ARSTAN. Tucson: Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, 1986.

[22] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. 地理学报, 1994, 49(2): 174-181.

[23] Kendall M G, Gibbons J D. Rank Correlation Methods. 5th ed. London: Edward Arnold, 1990.

[24] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 303-311.

[25] 王战. 中国落叶松林. 北京: 中国林业出版社, 1992: 1-29.

[26] 孙毓, 王丽丽, 陈津, 段建平, 邵雪梅, 陈克龙. 中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(5): 645-653.

[27] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 梁尔源, 方修琦, 王丽丽. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(2): 145-153.

[28] 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 小兴安岭红皮云杉年轮-气候关系及其衰退原因. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1935-1944.

[29] 赵志江, 谭留夷, 康东伟, 刘琪璟, 刘俊清. 云南小中甸地区丽江云杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 2012, 23(3): 603-609.

[30] Zhang Y, Bergeron Y, Gao L S, Zhao X H, Wang X M, Drobyshev I. Tree growth and regeneration dynamics at a mountain ecotone on Changbai Mountain, northeastern China: which factors control species distributions?. Écoscience, 2014, 21(3/4): 387-404.

[31] Zhang Y, Bergeron Y, Zhao X H, Drobyshev I. Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada. Journal of Plant Ecology, 2015, 8(4): 368-379.

[32] Yu D P, Wang G G, Dai L M, Wang Q L. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. Forest Ecology and Management, 2007, 240(1/3): 105-113.

[33] Takahashi K, Tokumitsu Y, Yasue K. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan. Ecological Research, 2005, 20(4): 445-451.

[34] Payette S, Delwalde A, Morneau C, Lavole C. Patterns of tree stem decline along a snow-drift gradient at treeline: a case study using stem analysis. Canadian Journal of Botany, 1996, 74(11): 1671-1683.

[35] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试. 地理学报, 1996, 51(S): 92-101.

